

УДК 620:92

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.136.1.37>

## ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО ПАЛИВА З ТВЕРДИХ КОМУНАЛЬНИХ ВІДХОДІВ

**Ковальов М.М.** – к.с.-г.н., доцент,

керівник наукових лабораторій промислового ґрибівництва та технологій захисту культивованих ґрибів, а також ґідропонного вирощування овочів в купольній теплиці, доцент кафедри загального землеробства, Центральноукраїнський національний технічний університет

**Медведєва О.В.** – к.б.н., доцент,

завідувач кафедри екології, охорони навколишнього середовища та здорового способу життя,

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Кириченко А.М.** – д.т.н., професор,

професор кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки,

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Мірзак Т.П.** – асистент кафедри екології, охорони навколишнього середовища та здорового способу життя,

Центральноукраїнський національний технічний університет

В статті експериментально досліджено та обґрунтовано особливості виготовлення паливних брикетів з твердих комунальних відходів та використання в якості сполучного компоненту картону та картопляного крохмалю. Однією з головних проблем сучасного виробництва є проблема відходів. В той же час тверді комунальні відходи – це проблема, яку ми можемо перетворити в джерело додаткового доходу. Дослідження питання оцінки екологічної ефективності використання паливних гранул дає змогу забезпечити більш раціональне використання твердих комунальних відходів, а також екологічно безпечного способу виробництва альтернативного палива та шляхів вирішення проблеми із забрудненням навколишнього середовища. Найбільш поширеним методом формування при виготовленні паливних гранул є пресування продавлювання сировини через канали матриці циліндричними роликками. Ефективність даного методу залежить від фізико-механічних властивостей вихідної деревної сировини, технологічних режимів та умов перебігу процесу гранулювання.

Одним з поширених видів енергоресурсів, що активно використовуються, є паливні гранули (пелети). Споживання паливних гранул збільшується постійно, особливо в умовах, в яких зараз знаходиться Україна.

Результати виконаних досліджень мають як фундаментальний, так і прикладний характер, і можуть бути використані для розуміння фізико-механічних та теплових процесів, що відбуваються при отриманні паливних гранул на основі твердих комунальних відходів, а також необхідні на стадіях проектування та експлуатації пресувальних пристроїв з плоскими матрицями та теплогенеруючих установок підприємств, що мають низьке енергоспоживання та забезпечують високу якість готового продукту.

Виконані експериментальні дослідження теплотехнічних та технологічних властивостей виготовлених зразків гранульованого палива на основі твердих комунальних відходів та сполучних компонентів з картону та картопляного крохмалю дозволили надати рекомендації щодо використання місцевих видів твердих комунальних відходів у паливно-енергетичному комплексі Кіровоградської області.

**Ключові слова:** паливні гранули, тверді комунальні відходи, опале листя, кавовий жом, пластмаси, сполучні компоненти.

**Kovalov M.M., Medvedieva O.V., Kyrychenko T.P., Mirzak A.M. Justification of the possibility of producing granular fuel from solid municipal waste**

*The article experimentally investigates and substantiates the peculiarities of the production of fuel briquettes from solid municipal waste and the use of cardboard and potato starch as a binding component. One of the main problems of modern production is the problem of waste. At the same time, municipal solid waste is a problem that we can turn into a source of additional income. The study of the issue of evaluating the environmental efficiency of the use of fuel pellets makes it possible to ensure a more rational use of municipal solid waste, as well as an environmentally safe way of producing alternative fuel and ways to solve the problem of environmental pollution. The most common method of forming in the production of fuel pellets is the pressing of raw materials through the channels of the matrix with cylindrical rollers. The effectiveness of this method depends on the physical and mechanical properties of the original wood raw material, technological modes and conditions of the granulation process.*

*One of the common types of energy resources that are actively used are fuel granules (pellets). The annual consumption of fuel pellets increases every year, especially against the background of a full-scale invasion by a terrorist state. The results of the performed research are of both fundamental and applied nature, and can be used to understand the physical, mechanical and thermal processes that occur during the production of fuel pellets based on solid municipal waste, and are also necessary at the stages of design and operation of pressing devices with flat matrices and heat-generating plants of enterprises that have low energy consumption and ensure high quality of the finished product.*

*Conducted experimental studies of thermotechnical and technological properties of manufactured samples of granulated fuel based on solid municipal waste and binding components made of cardboard and potato starch made it possible to provide recommendations for the use of local types of solid municipal waste in the fuel and energy complex of the Kirovohrad region.*

**Key words:** *fuel pellets, solid municipal waste, fallen leaves, coffee pulp, plastics, binding components.*

**Постановка проблеми.** Переробка та утилізація відходів є однією з найактуальніших проблем сьогодення не тільки в Україні, а й в більшості країн світу. Досить актуальною ця проблема є для обласних та густонаселених міст, де накопичується величезна кількість твердих комунальних відходів (ТКВ). Щороку в нашій країні накопичується більше 12 мільйонів тонн ТКВ, з яких лише 3 % переробляються, що є неприпустимим. Решта відходів вивозиться на спеціальні полігони або на звалища, які займають площу у 167 тис. га. Останні підрахунки свідчать, що на цій площі вже зосереджено близько 30 млрд тонн відходів [1, с. 11]. Відмінною рисою ТКВ є те, що вони містять високий відсоток паливної складової, що міститься в таких компонентах як гума, папір, полімери, дерево та інше. У зв'язку з цим останнім часом з'явилася велика кількість технологічних рішень, спрямованих на використання відходів в якості джерела енергії [2, с. 40]. Ця ідея є вирішенням двох найпоширеніших проблем нашого часу: отримання енергії та утилізації відходів. Звичайно ж, спалювання ТКВ має не лише переваги, а й суттєві негативні наслідки, складнощі у здійсненні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У багатьох країнах світу проводяться дослідження щодо отримання високоякісного палива, яке буде відновлюваним і матиме низьку собівартість [3, с. 54]. Розробку технологій переробки відходів необхідно проводити з урахуванням комплексного використання сировини та її екологічної безпеки. На сьогоднішній день таким вимогам задовольняє біопаливо, яке отримують за рахунок переробки відходів.

Для отримання біопалива застосовують технологію брикетування з попереднім сортуванням та подрібненням відходів, що надходять на сміттесортувальні комплекси [4, с. 78].

Паливні брикети являють собою спресовані відходи з певним компонентним складом. Перевагами використання паливних брикетів є такі аспекти, як велика

об'ємна щільність енергії, висока теплопровідність, постійність теплоти згоряння протягом усього часу горіння, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище в порівнянні з твердими копалинами [5, с. 17].

Найбільш поширені паливні брикети, виготовлені з відходів деревопереробки та сільського господарства, але це не дозволяє вирішити проблему накопичення твердих побутових відходів, що утворюються в умовах міста.

**Постановка завдання.** На відміну від паливних брикетів, виготовлених з деревини, в яких міститься лігнін та смоли, для виготовлення паливних брикетів з ТКВ необхідно застосовувати сполучні компоненти. При цьому необхідно враховувати, що сполучні речовини, що використовуються, не повинні знижувати якість палива. В якості сполучних компонентів використовувалися картон та крохмаль внаслідок їхньої доступності.

**Метою дослідження** є підвищення якості горіння брикетів твердих комунальних відходів, зокрема в початковій фазі, шляхом оптимізації їх технологічних параметрів пресування.

Для проведення експериментальних досліджень сполучних компонентів в паливних брикетах, виготовлених з ТКВ, були приготовлені 6 зразків розмірами  $10 \times 15 \times 1,5$  см масою 100 г. Брикети були виготовлені шляхом перемішування складових компонентів, потім отримана маса укладена у спеціально підготовлену форму, зверху покладений гніт в якості пресу. Зразки після пресування були відправлені до сушильної шафи. Сушіння проводилося при температурі  $200^\circ\text{C}$  протягом 45 хвилин.

Схема досліджу:

зразок 1 – 50 г ТКВ; 40 г пластику; 10 г картон (контроль);

зразок 2 – 50 г ТКВ; 40 г кавовий жом; 10 г картон;

зразок 3 – 50 г ТКВ; 40 г опалого листя; 10 г картон;

зразок 4 – 50 г ТКВ; 40 г пластику; 10 г картопляний крохмаль;

зразок 5 – 50 г ТКВ; 40 г кавовий жом; 10 г картопляний крохмаль;

зразок 6 – 50 г ТКВ; 40 г опалого листя; 10 г картопляний крохмаль.

В процесі проведення науково-дослідних робіт було виконано комплексний аналіз паливних гранул, отриманих за допомогою пресів із циліндричними та плоскими матрицями. Для випробування сферичних брикетів на міцність було створено прилад на базі настільного свердлувального верстата [6, с. 65].

Для визначення показників стирання, механічної міцності і щільності використовували загальноприйняті методи [7, 8, 9]. Статистична обробка отриманих даних проводилася за методикою дисперсійного аналізу [10, с. 51].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Головними факторами, що ускладнюють використання в енергетиці ТКВ, є висока вологість, низька енергетична щільність та теплота згоряння, а також неоднорідний гранулометричний склад. Для ТКВ на робочу масу складає  $Wr = 60\text{--}64\%$ . Високий вологовміст ТКВ пояснюється як специфічністю матеріалу, так і умовами транспортування. Підвищений вміст вологи знижує рухливість частинок палива аж до повної втрати ними сипучості, що призводить до значних проблем при їх транспортуванні трактом паливоподачі [11].

Одним із завдань нашого дослідження є отримання дешевого у виробництві палива зі стабільно високими теплотехнічними та технологічними властивостями. Поруч з цим досить цікавим є добір вихідного матеріалу [12, с. 79; 13, с. 44]. Найбільшою мірою роль вихідного матеріалу виконує органічна складова ТКВ. Як правило, складування проводиться на певних відкритих ділянках, де відходи

піддаються впливу навколишніх природних факторів, під впливом яких відбувається старіння та гниття органічної складової ТКВ. Виникає питання можливості застосування такої сировини для виробництва паливних гранул. Сировинний баланс ТКВ Кіровоградської області звичайно схиляється у бік використання власне органічної складової цих відходів, але існує і успішно функціонує ряд виробництв, які використовують інші види наповнювачів, наприклад, опале листя або кору листяних та хвойних порід дерев. Дослідження можливості використання їх як сировини також викликає інтерес.

Відповідно до методики виконано ряд аналітичних досліджень з визначення стирання та механічної міцності паливних гранул, виготовлених з різних типів наповнювачів. Отримані результати представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

### Стирання та механічна міцність гранульованого палива

Склад паливного брикету	відносна вологість, $w^r$ , %	механічна міцність, $DU$ %	стирання, %
ТКВ + пластик + картон	6,74	99,08	0,92
ТКВ + кавовий жом + картон	7,5	99,29	0,71
ТКВ + опале листя + картон	7,6	99,00	1,00
ТКВ + пластик + картопляний крохмаль	3,57	97,73	2,27
ТКВ + кавовий жом + картопляний крохмаль	5,47	98,65	1,35
ТКВ + опале листя + картопляний крохмаль	8,19	98,81	1,19

Результати узагальнення експериментальних даних щодо впливу вологості гранульованого палива, отриманого з ТКВ, на його механічну міцність представлені на рис. 1. При побудові цієї залежності результати, похибка визначення яких перевищувала 1 %, не враховувалися.

Отримана залежність може бути описана поліномом другого ступеню і має точку максимуму при відносній вологості  $\sim 7,2$  %. Аналіз графіка показав, що в діапазоні відносної вологості 5,0–9,5 % паливні гранули мають найвищі характеристики міцності, що відповідають першому класу міцності ENplus A<sub>1</sub> ( $DU \geq 98,0$  %). При зменшенні відносної вологості до 3,57 % гранули, вироблені з ТКВ та гумою в якості наповнювача, мають високий ступінь міцності ( $DU = 97,73$  %), що відповідає вимогам європейського стандарту для паливних гранул промислового призначення, класу ENplus B. З подальшим збільшенням вологості механічна міцність знижується, а якість гранул не відповідає стандартам.

Використання картону в якості сполучного компоненту біопалива дозволяє підвищити міцність та стійкість гранул до впливу вологи. Так, при масовій частці картону  $\sim 10$  % механічна міцність мала максимальні значення і склала  $DU = 99$  % при  $W^r = 6,7$ – $7,6$  %, тобто зросла приблизно на 1,1 %. При використанні картопляного крохмалю в якості сполучного компоненту механічна міцність та вологість коливалися в широких межах – при відносній вологості від 3,57 до 8,19 % міцність склала  $DU = 97,73$ – $98,81$  %.

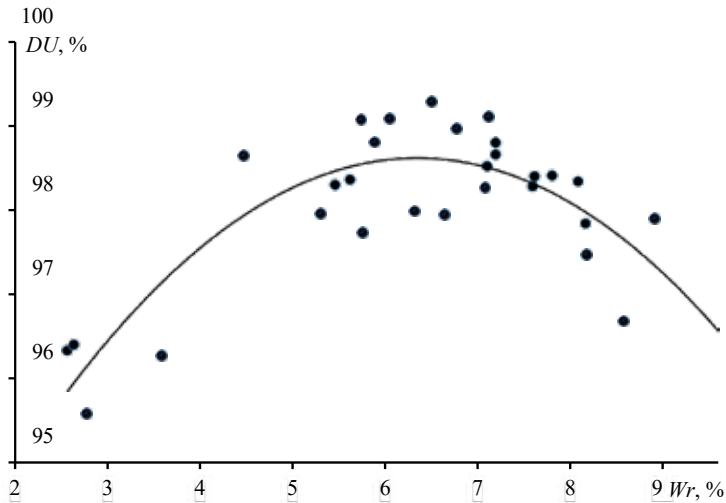


Рис. 1. Залежність механічної міцності гранул від вологості

Визначення теплоти згоряння здійснювалося відповідно до ДСТУ ISO 1928:2006 [9]. Експериментальні дослідження показали, що середнє значення нижчої теплоти згоряння на горючу масу для паливних гранул, вироблених з ТКВ, де в якості сполучного компоненту використовували картопляний крохмаль, складає  $Q_{daf} = 12,78$  МДж/кг. Найнижча теплота згоряння на горючу масу для паливних гранул, де в якості сполучного компоненту використовували картон, має більш високі значення: 16,62 МДж/кг, що на 23,1 % більше, ніж у гранул з картопляним крохмалем. Дослідження елементного складу показало, що у картоні дещо більший вміст водню та вуглецю, що забезпечило більшу теплоту згоряння на горючу масу в порівнянні з крохмалем.

Визначення елементного складу (див. табл. 2) проводилося на автоматизованому аналізаторі Euro EA-3000, що представляє новий стандарт аналізу CHNS (вуглецю, водню, азоту та сірки).

Таблиця 2

**Вміст вуглецю та водню на суху масу**

Вид сполучного компоненту	Показник	
	вуглець, %	водень, %
Картон	51,53	7,55
Картопляний крохмаль	51,40	7,15

Результати експериментальних досліджень показали, що нижча теплота згоряння паливного брикету  $Q_d$  становить: для зразка № 1 15,47 МДж/кг, для зразка № 2 15,99 МДж/кг, для зразка № 3 16,78 МДж/кг, для зразка № 4 11,91 МДж/кг, для зразка № 5 12,07 МДж/кг, для зразка № 6 12,21 МДж/кг (див. рис. 3).

При виробництві паливних брикетів для внутрішнього ринку можуть бути використані ТКВ з полігонів, де вони зберігалися тривалий час [14, с. 306; 15, с. 16]. Нижча теплота згоряння на горючу масу для паливних гранул, вироблених з ТКВ,

де в якості сполучного компоненту використовували картопляний крохмаль, що знаходилися у відвалі 7–10 місяців, складала  $Q_{daf} = 0,14\text{--}0,16$  МДж/кг, а для паливних гранул, вироблених з ТКВ, де в якості сполучного компоненту використовували картон  $Q_{daf} = 0,52\text{--}0,79$  МДж/кг.

Механічна міцність була близька до міцності гранул, отриманих зі свіжої сировини. Дані паливні гранули мали трохи менше вихід летких речовин, а також відрізнялися за кольором (див. рис. 3). Теплотехнічний аналіз ТКВ, що знаходилися у відвалі різний проміжок часу, підтвердив ці дані. Для зразка № 1 нижча теплота на горючу масу кожні півроку протягом періоду проведення досліджень підвищувалася в середньому на  $\sim 0,47$  МДж/кг.

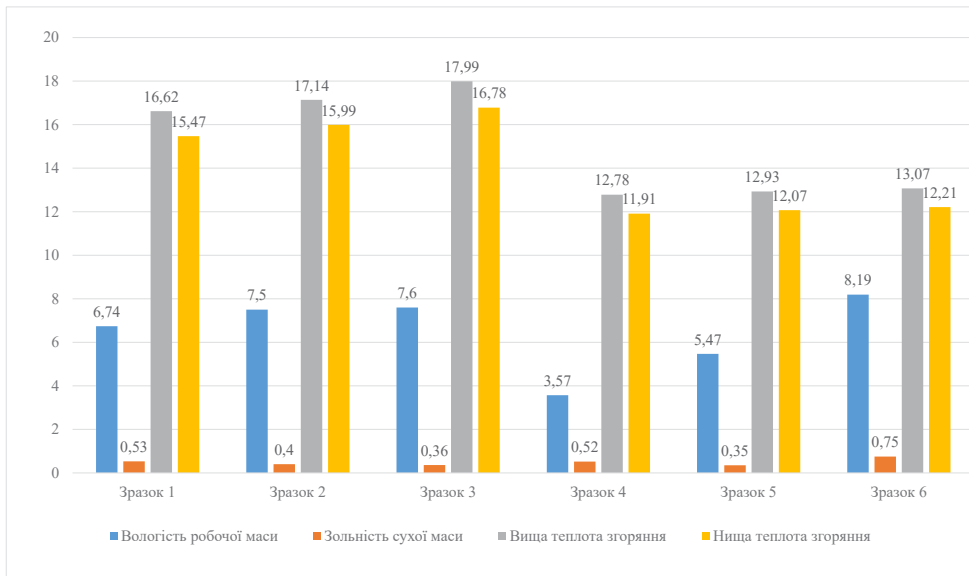


Рис. 2. Результати дослідження теплотехнічних властивостей паливного брикету



Рис. 3. Вихід летких речовин на горючу масу паливних гранул,  $V_{daf}, \%$

Зразки № 2 та № 3 мають більш високу теплоту згоряння – 17,14 та 17,99 МДж/кг відповідно, ніж зразок № 1, так вища теплота згоряння на паливну масу для паливних гранул, зразка № 1, склала  $Q_{def} = 16,62$  МДж/кг. Однак зольність (Ad) такого паливного брикету підвищується і може коливатися в межах від 0,36 до 0,75 %, при цьому вихід летких речовин знижується. Наведені значення зольності не перевищують граничне, встановлене європейським стандартом для промислових гранул класу EN plus A.

Експериментальні дослідження показали, що з ТКВ можуть бути отримані паливні гранули з досить високими технологічними показниками та стійкістю до дії вологи.

**Висновки і пропозиції.** Результати проведених досліджень показали, що вимоги стандартів є головними орієнтирами щодо граничних умов математичної моделі. До основних показників якості паливних гранул можна віднести стирання, механічну міцність і щільність, на величину яких впливають відносна вологість і параметри пресування, ступінь впливу яких слід оцінити експериментально при налагодженні робочих режимів дослідного прес-гранулятора.

Проведений аналіз зольності показав, що найкращим показником серед зразків має зразок № 3 (ТКВ + опале листя + картон) та № 5 (ТКВ + кавовий жом + картопляний крохмаль), трохи більший результат був отриманий для зразку № 2 (ТКВ + кавовий жом + картон). Значно більший вміст золи мають зразки № 1 (ТКВ + пластик + картон), № 4 (ТКВ + пластик + картопляний крохмаль) та № 6 (ТКВ + опале листя + картопляний крохмаль).

Аналіз теплотехнічних властивостей деревного палива показав, що найвищу теплоту згоряння мають зразки № 2 та № 3. Тому, враховуючи фізичні та теплотехнічні властивості цих варіантів досліду, можна стверджувати, що використання картону в якості сполучного компоненту для виготовлення паливних гранул є обґрунтованим. В якості сировини при виготовлення паливних гранул можна розглядати тверді комунальні відходи, що пролежали на полігоні тривалий час. Як показали дослідження, нижча теплота на пальне підвищується разом із терміном перебування відходів на полігоні. Гранули з такої сировини мають трохи менше вихід летких речовин, відрізняються темнішим кольором і можуть широко використовуватися на внутрішньому ринку енергоресурсів.

Найвищі показники якості гранул зосереджені в діапазоні відносної вологості 6,74–7,6 % при використанні в якості сполучного компоненту картону та 5,47–8,19 % при використанні в якості сполучного компоненту картопляного крохмалю. Ці результати повинні враховуватися під час вибору та попередньої обробки сировини перед пресуванням.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Коріненко Б. В., Худоярова О. С., Гура К. Ю., Ранський А. П. Циркулярна економіка та термохімічна конверсія твердих відходів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021, № 4, с. 7–19.
2. Кучерява І. М., Сорокіна Н. Л. Відновлювана енергетика в світі та Україні станом на 2019 р. – початок 2020 р. Гідроенергетика України, 2020, № 1–2, с. 38–44.
3. European Union Directive. Directive 2012/19/EU of the European parliament and of the council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Off. J. Eur. Union L* 2012, 197, 38–71.
4. Бондаренко Л. Ю., Стручаєв М. І., Вершков О. О., Філіпов Д. О. Підвищення ефективності використання відходів плодової деревини. Праці Таврій-

ського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 21, Т.1. С. 74–83.

5. Єременко О. І., Василенков В. Є., Руденко Д. Т. Дослідження процесу брикетування біомаси шнековим механізмом, Науковий журнал «Інженерія природокористування», 2020. 3(17), С. 15–22.

6. Viktor Bokov, Oleh Sisa, Volodymyr Mirzak, Olha Medvedieva. Pressing Technology and Burning Quality of Spherical Fuel Briquettes Made From Autumn Leaves. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, Vol. 1 (104), pp. 60–72 DOI: 10.15587/1729-4061.2020.198724.

7. ДСТУ EN 14774-1:2013 Тверде біопаливо. Визначення вмісту вологи. Метод висушування в сушильній шафі. Частина 1. Загальна волога. Стандартний метод (EN 14774-1:2009, IDT).

8. ДСТУ-П CEN/TS 15370-1:2013 Тверде біопаливо. Метод визначання характеристик плавкості золи. Частина 1. Метод характеристичних температур (CEN/TS 15370-1:2006, IDT).

9. Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згоряння методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згоряння. ДСТУ ISO 1928:2006 (ISO 1928:1995, IDT).

10. Яровий А. Т., Страхов Є. М. Багатомірний статистичний аналіз : начальнометодичний посібник для студентів математичних та економічних фахів. Одеса: Астропринт, 2015. 132 с.

11. Полігони для сміття в Україні будуватимуть по-новому: деталі. <https://www.unian.ua/ecology/10678716-poligoni-dlya-smitty-a-v-ukrajini-buduvatimut-povovomu-detali.html> (дата звернення 01.02.2024).

12. Клименко В. В., Кравченко В. І., Боков В. М., Гуцул В. І. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів: Монографія. /За ред. В.В. Клименка – Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 162 с.

13. Прокіп А. В. Еколого-економічна оцінка заміщення невідновлюваних енергоресурсів біологічно відновлюваними: моногр. / А.В. Прокіп. Львів.: ЗУЦК, 2010. 212 с.

14. Сіса, О. Ф. Обробка електричною дугою матриць для брикетування. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. – Кіровоград: КНТУ, 2015. Вип. 45, ч. 1. С. 302–308.

15. Ранський А. П., Коріненко Б. В., Гордієнко О. А., Євдокименко Є. О., Альтернативна енергетика: отримання паливних брикетів із пірокарбону термострукції полімерних відходів. Вісник ВПІ, № 1, с. 13–20, Лют. 28, 2023. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-13-20>.